⑲ 日本国特許庁（JP）　⑪特許出願公開
⑫ 公開特許公報（A）　昭58—84606

⑤Int. Cl.³	識別記号	庁内整理番号
B 21 B 37/00	113	7605—4E
C 21 D 7/00		6793—4K
G 01 L 5/00		7409—2F

㊸公開　昭和58年（1983）5月20日
発明の数　1
審査請求　未請求
（全 5 頁）

⑭鋼板の圧延荷重予測方法

㉑特　　願　昭56—181421
㉒出　　願　昭56（1981）11月12日

⑫発 明 者　斉藤良行
倉敷市鶴ノ浦1の1
⑫発 明 者　榎並禎一
倉敷市鳥羽1197の25
⑫発 明 者　木村求
倉敷市玉島柏島4500の49
⑪出 願 人　川崎製鉄株式会社
神戸市中央区北本町通1丁目1番28号
⑭代 理 人　弁理士　染川利吉

明　細　書

1. 発明の名称

鋼板の圧延荷重予測方法

2. 特許請求の範囲

(1) 圧延終了温度がオーステナイトーフェライト変態温度以下の鋼材の圧延において、圧延中に各パス毎の圧延直前の蓄積ひずみ、変態率を求め、次パスまでの変態率の変化量を被圧延材の平均温度、パス間時間の関数で与えられる数式モデルにより予測し、次パスまでのひずみの回復を被圧延材の平均温度、パス間時間、対数ひずみ、変態率の変化量の関数で与えられる数式モデルにより予測し、次パスの平均変化抵抗値の対数 $\ln k_{mcal}$ をオーステナイトの平均変形抵抗値の対数 $\ln k_{m\alpha}$ とフェライトの平均変形抵抗値の対数 $\ln k_{m\beta}$ の関数として係数がそれぞれの体積分率となる線型結合式で予測し、次パスの圧延荷重 P_{cal} を

$$P_{cal} = k_{mcal} \cdot Q_p \cdot l_d \cdot W$$

から予測することを特徴とする圧延荷重予測方法。ただし、W；板巾、Q_p；圧下力関数、l_d；投影接触弧長。

(2) 圧延中に各パス毎の圧延荷重、入側および出側の板厚、ロール回転数、パス間時間を測定し、鋼板の平均変形抵抗を求め、鋼板温度を予測し、さらにそのパス直前の変態率を予測することにより、標準平均変形抵抗 k_{m0} を鋼板温度、ひずみおよびひずみ速度の多項式から計算し、そのパス直前の蓄積ひずみ $\Delta\varepsilon$ を標準平均変形抵抗 k_{m0} および実測平均変形抵抗から求め、そのパス直前の変態率を修正し、次パスの変形直前の蓄積ひずみ $\Delta\varepsilon'$ を前記蓄積ひずみ $\Delta\varepsilon$、鋼板温度、パス間時間、対数ひずみ、次パスまでの変態率の変化量の関数で予測し、これらの結果から次パスの平均変形抵抗 k_{mcal} を

$$\ln k_{mcal} = (1-R) \ln k_{m\alpha} + R \ln k_{m\beta}$$

（ただしR；次パス直前の変態量）から予測し、次パスの圧延荷重 P_{cal} を

$$P_{cal} = k_{mcal} \cdot Q_p \cdot l_d \cdot W$$

から予測することを特徴とする特許請求の範囲第1項に記載した圧延荷重予測方法。

3. 発明の詳細な説明

本発明は、鋼板の圧延荷重予測方法、特にオーステナイト－フェライト変態温度（以下A_{r3}とする）以下の温度域での鋼の圧延において、変態に伴うひずみの回復およびオーステナイトとフェライトとの変形抵抗の違いに起因する圧延荷重の低下を数式モデルにより記述し、圧延荷重を予測することのできる圧延荷重予測方法に関する。

圧延機を計算機により制御し、圧延作業の能率化を図るとともに、圧延鋼板の形状、寸法を向上させることは従来から行われている。圧延制御要因として最も重要なものは圧延荷重であり、この圧延荷重を精度よく予測することが必要である。

圧延荷重Pは一般に次式で表わされる。

$$P = k_m \cdot Q_p \cdot ld \cdot W \cdots (1)$$

ここで、k_m；平均変形抵抗、

Q_p；圧下力関数、

ld；投影接触弧長、

W；板幅。

平均変形抵抗 k_m については該当パスのひずみ

ε，ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$，鋼板温度Tの関数として、従来から種々の予測式が提案されており、圧下力関数Q_p、投影接触弧長 ld についても圧下率、ロール形状の関数で表わされた種々の近似式がある。

また、鋼板の圧延温度がオーステナイト低温域に及んだとき、またはNbなどの再結晶を抑制する元素を添加した場合のように、前パスの圧延履歴が該当パスの圧延荷重に影響する場合についても、本発明の出願人は、すでに特願昭55－22990号に示すように、前パスの圧延履歴の影響をパス間で残った蓄積ひずみで表わし、蓄積ひずみを精度よく計算する数式モデルを作成し、この式を平均変形抵抗計算に応用して前パスの圧延履歴の効果を含めた圧延荷重の予測方法を開示した。しかし、圧延温度がA_{r3}以下になると、オーステナイト－フェライト変態に伴うひずみの回復により蓄積ひずみ量が減少すること、およびフェライトの変形抵抗値がオーステナイトより小さくオーステナイト＋フェライト二相組織の変形抵抗がオーステナイト単相よりも小さくなるため、前記特願昭

55－22990号に示す圧延荷重予測方法では、予測荷重が実測荷重より大きくなり充分な精度が得られない。

従って、本発明は、A_{r3} 以下の温度域においてオーステナイト－フェライト変態に伴う変形抵抗の変化を精度よく記述できる数式モデルを用いて圧延荷重を正確に予測できる圧延荷重予測方法を提供することを目的とする。

オーステナイト＋フェライト二相域での鋼板の平均変形抵抗 k_m は、オーステナイトの平均変形抵抗 $k_{m\alpha}$ とフェライトの平均変形抵抗 $k_{m\beta}$、変態率Rの関数として近似的に次式のように表わすことができる。

$$k_m = (1-R) \cdot k_{m\alpha} + R \cdot k_{m\beta} \cdots (2)$$

$k_{m\alpha}$ および $k_{m\beta}$ が次式に示すような加工硬化型の式で記述できる場合には、

$$\ln k_{m\alpha} = a_0 + a_1/T + a_2 \ln(\varepsilon + \Delta\varepsilon) + a_3 T \ln \dot{\varepsilon} \cdots (3)$$

$$\ln k_{m\beta} = b_0 + b_1/T + b_2 \ln(\varepsilon + \Delta\varepsilon) + b_3 T \ln \dot{\varepsilon} \cdots (4)$$

ただし、T；鋼板平均温度（K）、

ε；ひずみ、$\Delta\varepsilon$；蓄積ひずみ、

$\dot{\varepsilon}$；ひずみ速度（sec^{-1}）、

$a_0 \sim a_3$，$b_0 \sim b_3$；定数。

通常の圧延においては(5)式のような仮定をおいても問題がないため、k_m は更に(6)式のように近似できる。

$$R\{1-(k_{m\beta}/k_{m\alpha})\} << 1 \cdots (5)$$

$$\ln k_m = (1-R) \ln k_{m\alpha} + R \cdot \ln k_{m\beta} \cdots (6)$$

(3)，(4)式で温度T、ひずみε、ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ は測定可能な量であるので、蓄積ひずみ $\Delta\varepsilon$ と変態率Rが求められれば、(3)，(4)および(6)式を用いて変形抵抗 k_m を計算することができる。

ここで、N番目のパスから（N＋1）番目のパス間の蓄積ひずみ、変態率の変化について考える。

N番目のパスと（N＋1）番目のパス間での温度変化をΔT、変態後の経過時間を t、パス間時間を Δt とすれば、変態率の変化 ΔR_N は次のような実験式で表わされることはよく知られている。

$$\Delta R_N = exp\{-k(T) \cdot t^n\} - exp\{-k(T+\Delta T)(t+\Delta t)^n\} \cdots (7)$$

ただし、$k(T) = A \cdot exp(-B/T) \cdots (8)$

A，B，n；定数。

パス間でのひずみ回復過程は次のような微分方程式で記述する。

$$d\epsilon/dt = -exp(-U/T)\cdot(C_1\epsilon + C_2\epsilon^2) - C_3\frac{2R}{2t}(T,t) \cdots (9)$$

ただし、C_1, C_2, C_3；定数。

(9)式の右辺の最初の二項は変態以外の要因によるひずみの回復を表わし、第三項が変態に伴うひずみの回復を表わす。以下の取扱いを簡単にするため(9)式の右辺の定数のうちC_1, C_2,についてはオーステナイト域の回復を表わす式の係数と同じものを採用する。このことによる精度の低下は無視できる。(9)式の解は容易に求めることが可能であり、更に簡単な式の変形を行った後、（N＋1）パス直前の蓄積ひずみ$\Delta\epsilon_N$は次式のように記述できる。

$$\Delta\epsilon_N = \Delta\epsilon_{N\alpha}\cdot exp(-C_3\cdot\Delta R_{N\,cal}) \cdots (10)$$

ただし、$\Delta\epsilon_{N\alpha}$はオーステナイト域のひずみ回復過程を記述する次の微分方程式

$$d\epsilon/dt = -exp(-U/T)(C_1\epsilon + C_2\epsilon^2) \cdots (11)$$

から求めた蓄積ひずみであり、鋼板温度、パス間時間、対数ひずみの関数として特願昭55―22990号に示す方法により計算できる。

次の二つの式(12a),(13)式を繰り返し用いることにより、次パスの変態率および蓄積ひずみを計算し、(3)，(4)，(6)式により次パスの変形抵抗を予測することが可能である。

$$R_{N+1} = R_N + \Delta R_{N\,cal} = \sum_{i=1}^{N+1}\Delta R_{i\,cal} \cdots (12a)$$

$$R_i = \Delta R_i = 0,\ T_i > A_{r3} \cdots (12b)$$

$$\Delta\epsilon_{N+1} = \lambda_N\cdot(\epsilon_N + \Delta\epsilon_N) \cdots (13)$$

さらに、圧下力関数、投影接触弧長に関する公知の近似式を用いることにより、圧延荷重の精度よい予測が可能である。

パス間での変態率の変化を記述する(7)式は経験式であり、係数は実験データ解析により決定する。この方法により変態率を予測する場合の問題は、変態挙動が圧延により変化するため実験条件と大幅に異なる圧延を行った場合に誤差が生ずることである。特定のパス間での変態率の変化を求めるような場合には、その誤差の変形抵抗、圧延荷重予測精度に対する影響は無視できるが、各パス間での変態率の変化を求め、(12a)式を用いてその和として変態率を求める場合には、誤差の蓄積が

あり、圧延荷重精度低下の原因となる可能性が高い。そこで、もし圧延中に各パスでの変態率を圧延データから求めることができれば上記の問題を解消できる。以下にその方法を述べる。

最初に標準変形抵抗k_{mo}を次式で定義する。

$$\ln k_{mo} = (1-R)\ln k_{mo\alpha} + R\ln k_{mo\beta} \cdots (14)$$

ただし、(14)式の$k_{mo\alpha}$および$k_{mo\beta}$は、夫々(3)式および(4)式の右辺の$\Delta\epsilon$を０とおいた場合の$k_{m\alpha}$および$k_{m\beta}$の値である。(3)，(4)，(6)，(14)式により、$\Delta\epsilon$はk_mとk_{mo}の関数として次式のように表わされる。

$$\Delta\epsilon = [(k_{mobs}/k_{mo})^{(1/d)}-1]\cdot\epsilon \cdots (15)$$

ただし、

$$d = (1-R)\cdot a_2 + R\cdot b_2 \cdots (16)$$

$$k_{mobs} = \frac{P_{obs}}{Q_p\cdot ld\cdot W} \cdots (17)$$

k_{mobs}；実測変形抵抗、

P_{obs}；実測圧延荷重。

ここで、（N－1）番目のパスとN番目のパス間での変態率の変化ΔR_{N-1}に注目する。ΔR_{N-1}は

(10)式より次のように表わされる。

$$\Delta R_{N-1} = \frac{1}{C_3}\ln\left(\frac{\Delta\epsilon_{N-1\cdot\alpha}}{\Delta\epsilon_{N-1}}\right) \cdots (18)$$

(18)式の右辺の$\Delta\epsilon\alpha$は変態を無視した場合の蓄積ひずみの計算値であり、特願昭55―22990号に示す方法で鋼板温度、パス間時間、対数ひずみの関数として計算できる。また、$\Delta\epsilon_{N-1}$は圧延荷重の実測値から(15)，(16)，(17)式により求めることができる。更にC_3は実験圧延のデータを統計解析して求めた定数である。従って、(18)式を用いることにより、１パスからＮパスの各パス間の変態率の変化を圧延データから求めることができ、１パスからＮパスの各パス間での$\Delta R_{i\,cal}$をΔR_iに置き換えることにより(12a)式によりＮパス直前の変態率R_Nを予測できる。更にＮ番目のパス終了後、(N+1)番目のパスの圧延荷重を予測することを考える。まず(7)式よりＮ番目のパスと（Ｎ＋１）番目のパス間での変態率の変化$\Delta R_{N+1}\cdot cal$を予測し、次に(10)式により（Ｎ＋１）パス直前の蓄積ひずみ$\Delta\epsilon_N$を予測し、更に(12a)式により（Ｎ＋１）パス直前の変態率R_{N+1}を予測し、(3)，(4)，(6)式に

より変形抵抗 k_m を予測し、Q_p、ld について公知の近似式を用いて（N＋1）パスでの圧延荷重Pを予測することが可能である。

上述のように、オンラインで各パス直前の蓄積ひずみ、変態率が予測でき、次パスの圧延荷重が予測可能である。簡単な数式モデルを採用したため、計算機圧延制御の際の計算機の負担は、従来の圧延荷重予測モデルを用いた場合とあまり変わらない。なお、圧延データの統計解析および計算機制御に用いた鋼板温度の数式モデルは、変態発熱を考慮したフーリエの熱伝導方程式の公知の近似式を利用する。

次に、オンライン計算に本発明の圧延荷重予測方法を適用したときの精度をいくつかの実施例について述べる。

実施例 1

第1表に組成を示す供試鋼Aは転炉溶製したキルド鋼である。この連続鋳造後のスラブを1100℃に加熱後、ロール半径600㎜、ロール回転速度可変の可逆圧延機を用いて25㎜厚鋼板を製造す

るにあたり、本発明の方法を適用した。

第2表は圧延中に実測した板厚、圧延荷重と、オンライン中に温度モデルにより計算した鋼板平均温度、本発明の方法により予測した変態率、実測圧延荷重と予測圧延荷重との荷重比を示した。さらに従来法との精度を比較するため、特願昭55−22990号に示した方法により圧延荷重を計算し、実測値と比較した。変態発熱による温度変化を利用した熱伝導方程式を用いた変態温度推定法により、A_{r3} を764℃と推定した。第2表から圧延温度が A_{r3} 以上のパス（第2表中、第7、第14〜第16圧下）では、従来法と本発明方法との予測圧延荷重は全く一致し、しかも圧延荷重の予測精度はすぐれている。圧延温度が A_{r3} 以下のパス（第2表中、第17〜第19圧下）では、実測圧延荷重と変態による変形抵抗の変化を考慮しない従来法による予測値が変態率の増加とともに低下するのに対し、本発明の方法では850℃以上のパスと同等の精度で圧延荷重を予測できることがわかる。第2表より本発明方法による圧延荷重予

測精度は熱間圧延の全温度範囲内で荷重予測誤差範囲±5％以内であって、きわめて良好であることが示される。

第1表

供試鋼Aの化学成分（Wt.％）

C	Si	Mn	P	S	V	Nb	solAl
0.06	0.31	1.61	0.015	0.003	0.050	0.030	0.025

第2表

供試鋼Aの圧延荷重予測精度

	板厚 (㎜)	温度 (℃)	変態率 (%)	実測圧延荷重 (トン)	予測圧延荷重（トン）		実測圧延荷重／予測圧延荷重	
					従来法	本発明法	従来法	本発明法
第7圧下	109.43	936	0	3423	3263	3263	1.049	1.049
第14圧下	43.94	795	0	4088	4119	4119	0.992	0.992
第15圧下	37.90	783	0	4082	4191	4191	0.974	0.974
第16圧下	33.19	770	0	3869	3801	3801	1.018	1.018
第17圧下	29.42	754	6	3587	3804	3736	0.943	0.960
第18圧下	26.95	736	16	3008	3410	2999	0.882	1.003
第19圧下	24.98	706	28	2759	3423	2827	0.806	0.976

実施例2

第3表に組成を示す供試鋼Bは転炉溶製したキルド鋼である。連続鋳造後のスラブを1250℃に加熱後、粗圧延を行った後、ロール半径375〜390mmのロール回転速度可変のタンデム型7段仕上圧延機を用いて5.2mm薄鋼板を製造するにあたり、本発明の方法を適用した。

第4表は、第2表と同様、供試鋼Bについての圧延荷重予測精度を示したものである。熱伝導方程式を用いたA_{r3}推定法によりA_{r3}を880℃と推定した。変態率が5%以下のパス（第4表中、仕上第2圧下、仕上第5圧下）では、従来法、本発明方法とも圧延荷重予測精度はすぐれている。変態率が10%をこえるパス（第4表中、仕上第6圧下、仕上第7圧下）では、変態による変形抵抗の変化を考慮しない従来法の圧延荷重予測精度は低下する。これに対して本発明方法では全パスについて荷重予測誤差範囲は±5%以内に収まり、きわめて良好であることがわかる。

第3表

供試鋼Bの化学成分（Wt.%）

C	Si	Mn	P	S	sol.Al
0.03	0.02	0.29	0.010	0.009	0.034

第4表

供試材Bの圧延荷重予測精度

	板厚 (mm)	温度 (℃)	変態率 (%)	実測圧延荷重 (トン)	予測圧延荷重（トン）		実測圧延荷重／予測圧延荷重	
					従来法	本発明法	従来法	本発明法
仕上第2圧下	13.65	943	0	1186	1199	1199	0.989	0.989
仕上第5圧下	6.70	876	2	807	832	827	0.970	0.975
仕上第6圧下	5.79	858	16	766	862	775	0.889	0.988
仕上第7圧下	5.19	841	32	658	799	678	0.824	0.970

ここでの実施例は、厚板圧延、ホットストリップ圧延についての場合であるが、本発明の圧延荷重予測方法はこのほか棒鋼、形鋼など他の圧延材の計算機制御による自動化圧延にも応用可能である。

代理人　弁理士　染川利吉